第 58 卷 第 7 期
2015 年 7 月

地 球 物 理 学 报
CHINESE JOURNAL OF GEOPHYSICS

Vol. 58, No. 7
Jul., 2015

邹旭,杨国韬,王继红等. 2015. 基于激光雷达手段的海南地区重力波与其波谱的季节分布特性研究. 地球物理学报,58(7):2274-2282,doi:10.6038/cjg20150706.

Zou X, Yang G T, Wang J H, et al. 2015. Gravity wave parameters and their seasonal variations derived from Na lidar observations at Hainan, China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese),58(7):2274-2282,doi:10.6038/cjg20150706.

基于激光雷达手段的海南地区重力波与其波谱的季节分布特性研究

邹旭[1,2],杨国韬[1*],王继红[1],龚少华[2],程学武[3],
岳川[1],张铁民[2],傅军[2]

1 中国科学院国家空间科学中心,北京 100011
2 海南师范大学物理与电子工程学院,海南海口 571158
3 中国科学院武汉物理与数学研究所,武汉 430071

摘要 利用子午工程海南激光雷达对我国海南地区上空进行持续观测,通过 3 年的累积观测数据对我国低纬度地区重力波活动的季节分布特性进行研究,依据重力波线性理论对海南地区上空的大气密度扰动规律、空间功率谱及时间频率谱进行分析,并通过选择波长在 1 km 至 8 km 范围内具有特定波长以及具有波动周期为 60 min 至 25 min的特定频率的重力波辅助研究大气密度扰动的季节变化规律,总结得出海南地区重力波活动具有夏季大、春秋季小、而冬季依然频繁的季节性分布规律.结合海南地区特殊的地理位置与当地季节性气候特征分析得出海南地区上空重力波活动季节性变化的可能原因为青藏高原地形及我国南海地区存在的热带强对流与赤道潜流共同作用的结果.

关键词 海南;激光雷达;重力波;季节分布;青藏高原地形及对流;赤道潜流

doi:10.6038/cjg20150706 **中图分类号** P351 **收稿日期** 2015-01-22,2015-06-05 收修定稿

Gravity wave parameters and their seasonal variations derived from Na lidar observations at Hainan, China

ZOU Xu[1,2], YANG Guo-Tao[1*], WANG Ji-Hong[1], GONG Shao-Hua[2], CHENG Xue-Wu[3],
YUE Chuan[1], ZHANG Tie-Min[2], FU Jun[2]

1 *National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100011, *China*
2 *College of Physics & Electronic Engineering, Hainan Normal University, Haikou Hainan* 571158, *China*
3 *Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan* 430071, *China*

Abstract Sodium lidar is recognized as a useful tool to investigate gravity wave (GW) which influences the circulation, structure and composition of middle and upper atmosphere notably. For further understanding GW and their characteristics, more sufficient observational data within global models, especially those at low latitude are extremely expected. Meanwhile, long-term observations are also quite helpful for the GW analysis.

As one part of Meridian Project, the observational Na lidar system at Hainan (19.50°N,

基金项目 国家自然科学基金(NSFC40905012, 41174129, 41474130,41264006,41364005),海南省自然科学基金(513146),中国博士后项目基金(2012M520397),以及中国科学院国家空间科学中心重点培育项目资助.

作者简介 邹旭,男,1981 年生,副教授,2004 年毕业于吉林大学,主要从事中高层大气研究. E-mail:christian5022@163.com

* **通信作者** 杨国韬,男,研究员,主要从事激光雷达和中高层大气研究. E-mail:gtyang@spaceweather.ac.cn

109.1°E) employed the double wavelengths laser beam, which is consists of three channels for Mie scattering, Rayleigh scattering and broadband sodium fluorescence. A pulsed Nd:YAG laser was rebuilt to trigger off two green laser beams simultaneously, one of which was 532 nm and used to excite the Mie and Rayleigh scattering, and the other laser beam pumped by a pulsed dye laser was about 589 nm and with 30 mJ per pulse. Resonant fluorescence from the sodium layer was received by a Cassegrain telescope with a primary mirror of 1000 mm diameter. The lidar profiles are stored automatically in a computer. The temporal and spatial resolution was about 167s and 96 m, respectively.

Seasonal variations of the GW activity and their spectra at Hainan were studied with comparison to the previous reports and the predictions of theories of GW saturation and dissipation. The seasonal variations of GW activity and characteristics spectra at Hainan are mainly presented as follows: (1) The mean RMS atmospheric density perturbation over Hainan are 5.63 %, which at solstice are obviously larger than that near the equinox. And the GW activity in winter is still active, which are quite different from those reports at the middle latitude area. (2) Due to the linear theory, the m spectra were calculated which show power law shapes and their range of variation were between −2.14 and −3.56 with an annual mean value of −2.93. The calculated ω spectra were between −1.22 and −2.36 with an annual mean value of −1.80, respectively. (3) The amplitudes of atmospheric density perturbation spectra at $m=2\pi/8$km, $2\pi/4$km, $2\pi/2$km, $2\pi/1$km and $\omega=2\pi/60$min, $2\pi/40$min, $2\pi/25$min all exhibit large nightly variability as well as large seasonal variations, with the maxima occurring near the solstice. While in winter, their amplitudes indicated that the GW activity is still active, which are consistent with the RMS atmospheric density perturbation annual variations. (4) The seasonal variation regularity of the GW activity at Hainan and the possible GW source there were discussed. It is concluded that the reaction of the Qinghai-Tibet plateau with the convection and the equatorial undercurrent may be the main reason of the GW behaviors at Hainan.

The seasonal variation of GW activity at Hainan were measured based on 3 year's observation. The RMS atmosphere perturbation, the vertical wave number spectral amplitudes at $2\pi/8$km $2\pi/4$km $2\pi/2$km and $2\pi/1$km and ω spectra with those frequencies at $2\pi/60$min, $2\pi/40$min, $2\pi/25$min all show that the semiannual maxima occur near the solstices, while the GW activity in winter is still active, which is quite different from the middle latitude area. The vertical wave number spectra and frequency spectra were also calculated which were fitted well with the theoretical value. It is concluded that the fact of the Qinghai-Tibet plateau's topography, intense convection of South China Sea and the equatorial undercurrent could be the main reason of the GW's behaviors at Hainan.

Keywords　Hainan; Lidar; Gravity wave; Seasonal variations; Topography of Qinghai-Tibet plateau convection; Equatorial undercurrent

1　引言

重力波作为中高层大气中最重要的动力学过程之一，近些年来在中高层大气领域研究中得到广泛的关注(Senft and Gardner, 1991; Gardner and Voelz, 1987; Gardner, 1994, 1996; Yang et al., 2006; Gong et al., 2013).重力波对中高层大气的循环、结构、组成都具有重大影响.由于重力波的饱和、衰减、消散等过程，它们可将能量和动量从低层大气传输到中间层上部及低热层中，有助于我们研究大气的大尺度的循环动力学行为.同时，重力波观测可以提供在不同地区、不同季节的重力波活动的变化情况及其参数的分布情况.对于我们深入研究

全球大气能量收支以及能量和动量的平衡过程有着相当重要的意义.

激光雷达是研究重力波的有效手段,它是通过地面发射激光对大气进行研究的一种主动式探测方法,近些年来在重力波研究领域得到了广泛应用.如:Gardner 等基于 CEDAR 观测手段研究了北美地区重力波活动情况,并提取出重力波活动数据,总结了 Urbana 地区的重力波活动行为(Senft and Gardner,1991; Gardner and Voelz, 1987; Gardner, 1994, 1996);Yang 等基于巴西激光雷达观测数据报道了南半球重力波的季节变化存在与北半球完全不同的活动行为(Yang et al., 2006);Gong 等基于子午工程数据对我国北京地区的重力波活动的频度及强度进行统计研究并分析其成因(Gong et al., 2013),等等.而目前国际上普遍认为重力波的产生和传播与观测地所处的地理位置有着极其密切的关系.低纬地区相比于高纬地区具有更加丰富的大气动力学特性,往往能够观测到更加具有特异性的重力波事件发生.从以往的研究来看:青藏高原隆起的影响、电离层突发东亚异常以及钠层突发在中国高频度的出现等行为都揭示出中国地区上空中高层大气具有明显的区域性特色(Wan et al.,1998; Xu et al. 2008),而海南岛是我国唯一的低纬度地区,位于中国大陆最南端,同时也是进行全球大气动力学行为研究的重要观测地点.因此,在海南地区开展低纬度地区的大气波动研究具有相当重要的意义,这有助于我们了解我国低纬地区的重力波波源、重力波参数分布及其相互关系,重力波传播过程受背景大气风场、温度的影响,并有助于我们继续深入研究低纬地区中层顶区的大气动力学过程.

本文利用子午工程钠荧光激光雷达于 2010—2013 年在中国海南观测台站获取的钠层观测数据对海南地区重力波活动规律进行研究.通过分析海南地区上空的大气密度扰动、空间功率谱、时间频率谱,以及特定波长及频率的重力波活动行为,研究得出海南地区大气密度扰动的季节变化规律,并结合我国地形因素以及我国南海地区的洋流特性分析总结了海南上空重力波活动季节性变化的原因.

2 数据及讨论

2.1 实验设备

本文的观测数据是基于子午工程海南钠荧光激光雷达得到的.目前海南台站工作的激光雷达为双波长激光雷达,波长分别为 532 nm 和 589 nm.其中钠荧光激光雷达采用染料激光器进行激发,产生 589 nm 的激光探测光束(其能量为 30 mJ),重复频率为 30 Hz.接收望远镜的参数如下:主镜直径为 1000 mm,视场角为 0.2~2 mrad,发射出的激光光束距离接收望远镜中心 6 m.接收信号通过带通光学滤光片(带宽为 1 nm)、致冷光电倍增管、前置放大器和时间分辨的光子计数器进行信号探测及放大,最终由计算机进行处理.与子午工程北京双波长激光雷达相同,海南激光雷达钠密度文件为 5000 个激光脉冲累积,高度分辨率为 96 m,时间分辨率约为 167 s(张铁民等, 2013).

2.2 数据处理

本文采用了 Yang 等(Yang et al., 2006,2008a,2008b)改进的钠荧光激光雷达数据提取重力波参数方法,利用自编程序对重力波参数进行提取,具体过程如下:

首先,通过对原始钠回波光子数进行反演,得到钠密度数据文件.其次,将每天的钠密度数据 $\rho(z,t)$ 进行平均后,得到了钠密度的平均数值 $\rho_0(z)$.我们通过定义钠层密度扰动:

$$r_s(z,t)=\frac{\rho(z,t)-\rho_0(z)}{\rho(z,t)}, \tag{1}$$

并利用公式(1)求解得到所有的钠层密度扰动数值.根据公式(2)和(3),即钠层扰动与大气密度扰动的联系公式,可以将单个大气密度扰动数据计算出来.

$$r_s(z,t)=-\frac{1}{\gamma-1}\left[1-\frac{\gamma H(z-z_0)}{\sigma_0^2}\right]r_a(z,t), \tag{2}$$

$$r_a(z,t)=-\frac{\gamma-1}{1-\gamma Hf'(z)}r_s(z,t), \tag{3}$$

其中,$r_s(z,t)$ 代表钠层密度扰动,$r_a(z,t)$ 代表大气密度扰动,σ_0 是未扰动钠层的平均厚度,约为 4.5 km.因为在距离地表 94±2 km 高度处,钠层密度较大且随重力波的传播变化剧烈.因此我们在提取重力波参数时,将这一部分的钠层密度数据丢弃.而最终的大气密度扰动可利用公式(3)进行计算(其中 $f'(z)=-\rho_0(z)/\rho'_0(z)$,即本底钠层密度与本底钠层密度微分之比).

大气密度的均方根值是对大气密度扰动进行全天时及全空间的平均化处理后最终得到的(如公式(4)),其中 T 为全天观测时,L' 为舍弃位于 94±2 km处非高斯分布钠层厚度后的钠层总厚度:

$$\langle r_a^2(t)\rangle=\frac{1}{TL'}\int_{z_0-L/2}^{z_0+L/2}\int_{t-T/2}^{t+T/2}r_a^2(z,t)\mathrm{d}t\mathrm{d}z. \tag{4}$$

我们通过子午工程海南激光雷达累积的 2010—2013 年共 160 天的有效观测数据，经上述过程反演并平均，最终求得海南地区大气密度扰动季节分布值. 将所有数据统计后进行最小均方误差拟合(MMSE 拟合)后作出海南地区年度季节变化规律的图谱.

海南地区大气密度扰动年度均方根分布规律如图 1 所示. 圆点代表大气密度绕动的均方根值，所有单天统计数据经 MMSE 拟合后用来表征大气密度扰动的季节分布规律(如图 1 中的黑色曲线所示). MMSE 拟合参数如表 1 所示. 拟合数据表明：年度大气密度扰动的平均值为 5.63%，而夏季的大气密度扰动显著高于其他季节. 总体呈现夏季大、春秋季小的分布态势. 全年扰动贡献值分别为 0.48%，及 0.57%，大气密度扰动的最低值出现在春分及秋分日前后.

Senft 和 Gardner (1991) 曾经对美国 Urbana 地区(88°W，40°N)的大气密度扰动季节规律进行了报道. 发现中纬度地区的重力波观测数据是在夏季

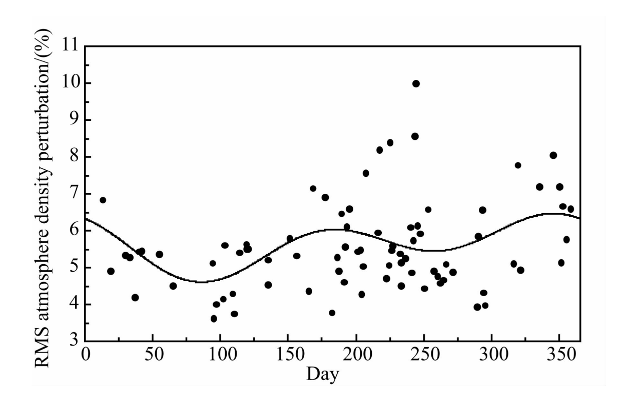


图 1　海南地区大气密度扰动年度方均根分布

Fig. 1　Seasonal variations of the RMS atmospheric density perturbations

扰动幅度最大，而春秋分时出现扰动极小值的情况. 同时，Gong 等在对同纬度的北京地区重力波事件进行统计后，认为北京地区上空重力波活动季节性变化与美国 Urbana 地区的相似，也是夏季重力波活动强度及频率较大，而冬季重力波的活动频率及强度较弱(Gong et al., 2013). 而相比于此，海南地区的重力波活动情况整体也呈现夏季较大、春秋季节较小的特征，这与以往关于中纬度地区的重力波活动的规律报道有一定相似性. 但是，从活动规律来看，海南地区冬季重力波的活动依然活跃，半年贡献值 A_2 略大于全年贡献值 A_1，这一结果表明海南地区的重力波活动特性与中纬度地区有明显区别.

重力波的垂直波数谱和时间频率谱是研究重力波场能量在各个垂直波数或频率上的相对分布概率的重要方法. 根据重力波线性理论，重力波垂直波数谱以公式(5)作为定义：

$$Fa(m) = \int_{-\infty}^{\infty} Ba(s,0)\mathrm{d}s = \int_{-\infty}^{\infty} \langle ra(z,t)\cdot ra(z-s,t)\rangle e^{ims}\mathrm{d}s, \tag{5}$$

其中 $\langle ra(z,t)\ ra(z-s),t\rangle$ 为大气密度扰动的自相关函数，通常用 $Ba(s,0)$ 表示(s 为相邻高度的差值). 同时在进行垂直波数谱的数据处理上，我们采取如公式(6)的方法，先对大气密度扰动做预白噪声化处理：

$$y(z,t) = ra(z,t) - 0.95\ ra(z-\Delta z,t), \tag{6}$$

其中 $y(z,t)$ 为对 $ra(z,t)$ 的预白噪声化处理函数，随之对其进行加 hamming 窗修正处理(Tsuda et al., 1989)，最后经傅里叶变换可得到海南地区每一单天事件的波数谱 $Fa(m)$.

通过对垂直波数谱的单天事件进行作图发现，海南地区的重力波垂直波数谱整体趋势呈直线型分

表 1　重力波拟合参数年度及半年度贡献值列表

Table 1　Annual and semiannual components of gravity wave parameters

	A_0	A_1	A_2	d_1	d_2	u_0	u_1	u_2	u_{d_1}	u_{d_2}	d_1-d_2
$\langle ra^2\rangle^{1/2}$(%)	5.63	0.48	0.57	−72	−9	0.14	0.20	0.20	22	13	−63
$Fa(m_8)$, m/cycles	1.69	0.49	0.53	−40	−14	0.13	0.19	0.19	23	10	−26
$Fa(m_4)$, m/cycles	0.22	0.10	0.10	−34	−18	0.02	0.03	0.03	17	9	−16
$Fa(m_2)$, m/cycles	0.087	0.039	0.039	−26	−15	0.008	0.001	0.001	18	8	−11
$Fa(m_1)$, m/cycles	0.02	0.009	0.01	−31	−15	0.002	0.003	0.003	22	8	−16
$Fa(\omega_{60})$, s/cycles	0.97	−0.23	0.33	−11	−24	0.07	0.11	0.11	27	9	13
$Fa(\omega_{45})$, s/cycles	0.70	−0.23	0.05	18	−17	0.08	0.12	0.11	29	59	35
$Fa(\omega_{25})$, s/cycles	0.12	−0.03	−0.05	−30	50	0.01	0.01	0.01	22	8	−80

注：重力波参数方程 $y=A_0+A_1\cos[2\pi/365(d-d_1)]+A_2\cos[4\pi/365(d-d_2)]$. u_0, u_1, u_2, u_{d_1}, u_{d_2} 分别代表 A_0, A_1, A_2, d_1, d_2 的误差.

布(几个典型的单天事件如图2(a—d)所示),这与理论公式符合的很好(Senft and Gardner, 1991).同时,我们对重力波垂直功率谱的谱斜率 p 进行了年均统计分布.经过对所有单天事件的波数谱曲线进行平均化处理后得到年平均的谱斜率为 $p=-2.93$(如图2e).这与Dewan(1994)提出的线性不稳定理论和Hines(1991)提出的多普勒扩散理论预测的结论 $p=-3$ 符合的非常好.垂直波数谱斜率的季节性统计分布规律如图3f所示.其中最缓的斜率是−2.14,最陡的斜率是−3.56. Senft和Gardner报道的斜率值在−2.20和−3.55之间,其变化范围与我们计算的波数谱变化范围相符.其他地区如Collins等(1994)报告的南极地区功率谱斜率范围是−2.0到−3.5,也相对接近我们的结果.同时Senft等利用一个月的数据报道过最缓斜率为−2.1的波事件(Senft et al., 1993),与我们的结果也比较接近.

根据重力波理论,通常选取波长小于10 km的重力波的季节分布规律来表征重力波活动规律.我们选取了波长为8、4、2、1 km的重力波来进行研究(如图3所示),并分别用 $m_8=2\pi/8\text{km}$, $m_4=2\pi/4\text{ km}$, $m_2=2\pi/2\text{km}$, $m_1=2\pi/1\text{km}$ 来代表其对应的

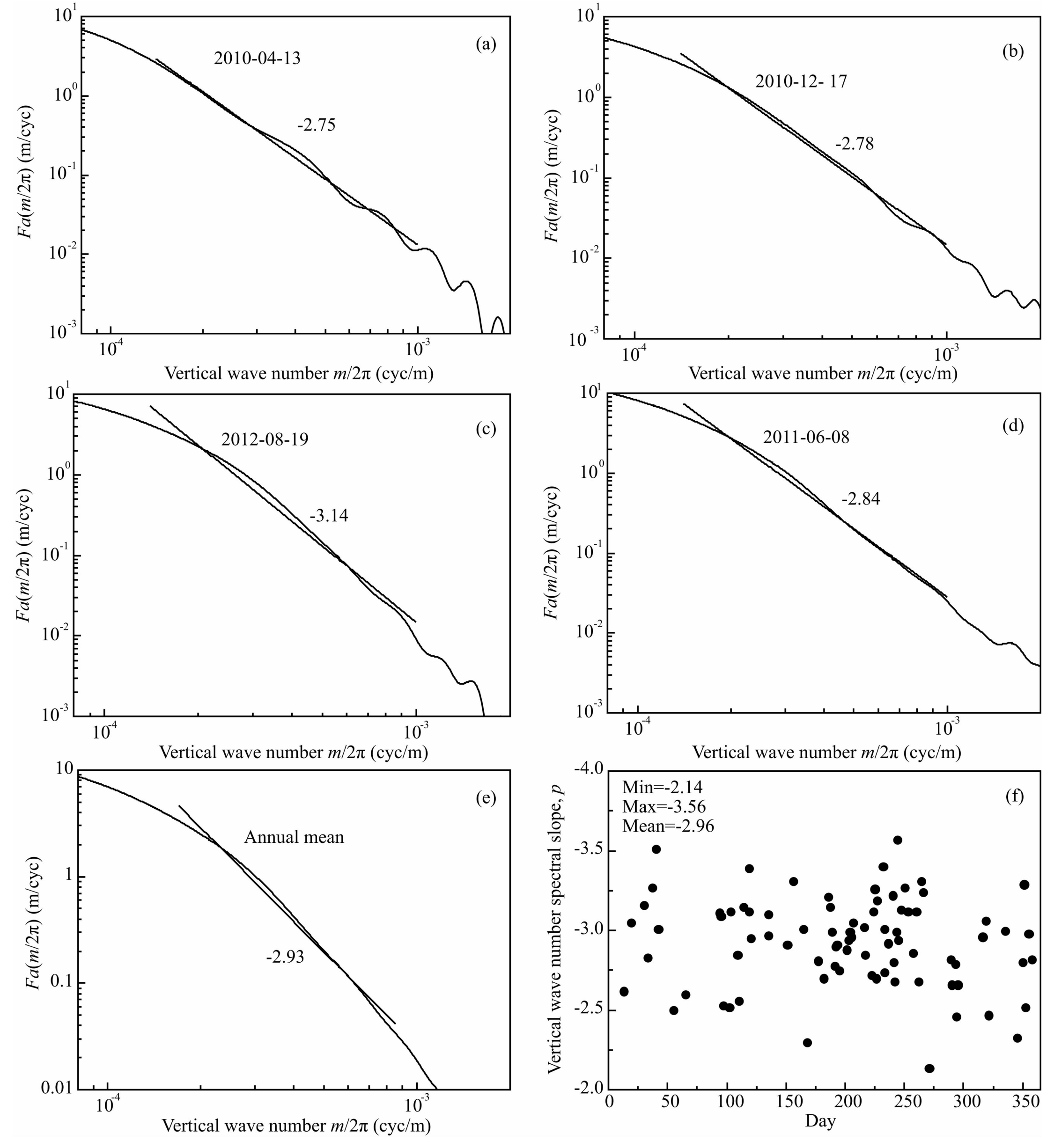


图2 (a)—(d) 海南地区垂直波数谱的单天实例;(e) 垂直波数谱的年度平均谱;(f) 垂直波数谱斜率的统计分布

Fig.2 (a)—(d) Four examples of the vertical wave number spectra of the atmospheric density perturbations associated with internal gravity waves at Hainan (e) Annual mean of vertical wave number spectra and (f) the distribution of their spectrum slopes

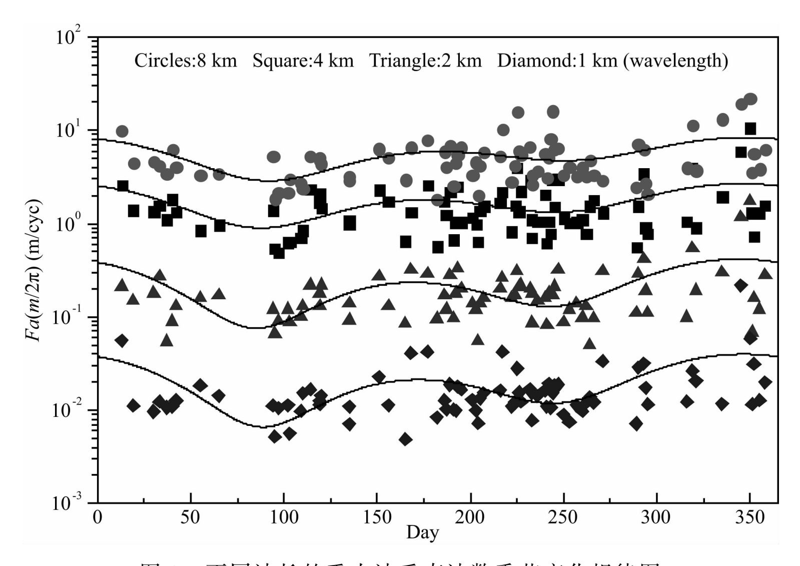


图 3　不同波长的重力波垂直波数季节变化规律图

Fig. 3　Seasonal variations of vertical wavenumber spectral amplitudes

波数值. 根据图 3 和表 1 给出的参数信息，我们可以看到 m_8 的年度平均值是 1.69(m/cycles)，这一数值远小于 Senft 和 Gardner(1991)报告的 12.5(m/cycles). 波长为 4、2 km 和 1 km 的小尺度波的扰动，其波数 m_4，m_2 和 m_1 的全年平均值分别是 0.22(m/cycles)、0.087(m/cycles)，和 0.02(m/cycles)，而值得注意的是其全年相对振幅 A_1 以及半年相对振幅 A_2 在数值上十分接近. 另外上述波长范围在 8～1 km 之间的几个特定波长的垂直波数谱的季节变化特性与大气密度扰动的季节变化特性一致. 这一结论同前文所述的大气密度扰动的季节分布规律都符合得很好. 即重力波活动的极大值出现在夏季夏至点附近，最小值约在春秋分时出现，冬季重力波的活动仍然活跃.

我们同时用时间频率谱对重力波扰动的季节分布特性进行了表征. 根据重力波线性理论，大气密度扰动的时间频率谱定义为

$$Fa(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \langle ra(z,\omega) \cdot ra(z-s,\omega) \rangle e^{i\omega z} dz. \quad (7)$$

通过对大气密度扰动进行预白噪声化及加窗处理后，经过傅里叶变换得到了所有单天事件的频率谱 $Fa(\omega)$，如图 4(a—d)所示. 通过计算谱斜率 q 及其年均统计分布，发现 q 的分布范围在 −1.22 和 −2.36之间，平均值为 −1.80(如图 4(e—f)所示). 其他如 Beatty 等观测到的 Arecibo 地区值为 −1.85 (Beatty et al., 1992)，Gardner 等在计算北美地区的数据得出当地的 q 值为 −1.82(Senft and Gardner, 1991)，以上结果与我们的结果相类似，均接近理论预测值 −5/3.

我们选取几个典型波动周期 60、40、25 min 的重力波对其活动行为进行研究，给出了其年度分布规律(如图 5 所示). 根据图 5 和表 1 给出的参数信息，我们可以看到 ω_{60}，ω_{40} 和 ω_{25} 的年度平均值是0.97 (s/cycles)，0.70(s/cycles)和 0.12(s/cycles)，其最大波动值的对应相位也出现在夏至点附近，这说明上述频率范围在 2π/60min～2π/25min 之间的几个特定频率重力波的时间频率谱季节变化特性与大气密度扰动的季节变化特性相一致. 整体呈现夏季较大、春秋季节较小的特征，而冬季重力波的活动仍然活跃.

根据以上的研究结果，我们可以知道：海南地区的重力波季节变化特性如大气密度扰动、8～1 km 及 60～25 min 范围内的垂直功率谱及时间谱，均整体呈现夏季扰动较大，春秋季节扰动较小的特征，以及冬季重力波的活动仍然活跃的季节变化规律. 这一现象的主要原因我们尝试从两方面入手进行分析：

首先，对比我国中纬度地区(北京地区)，根据以往报道，其上空重力波活动季节性变化的主要原因是青藏高原的地形及对流因素与背景风场的季节性变化共同作用的结果(Gong et al., 2013). 而这一结果也与同纬度的 Gardner 等报道的重力波事件的季节分布规律相吻合(Senft and Gardner, 1991). 即雷达观测的重力波扰动强度从冬季到夏季重力波活动性逐渐增强，从夏季到冬季重力波活动性逐渐减弱，具有明显的夏季极大、春秋季节小的季节变化性. 而海南地区的重力波活动也是整体呈现夏季较大、春秋季节较小的特征，这一基本的分布趋势也与我国中纬度地区的夏季及春秋季的变化规律相同. 结合以往文献对我国北京地区重力波波源的解释，

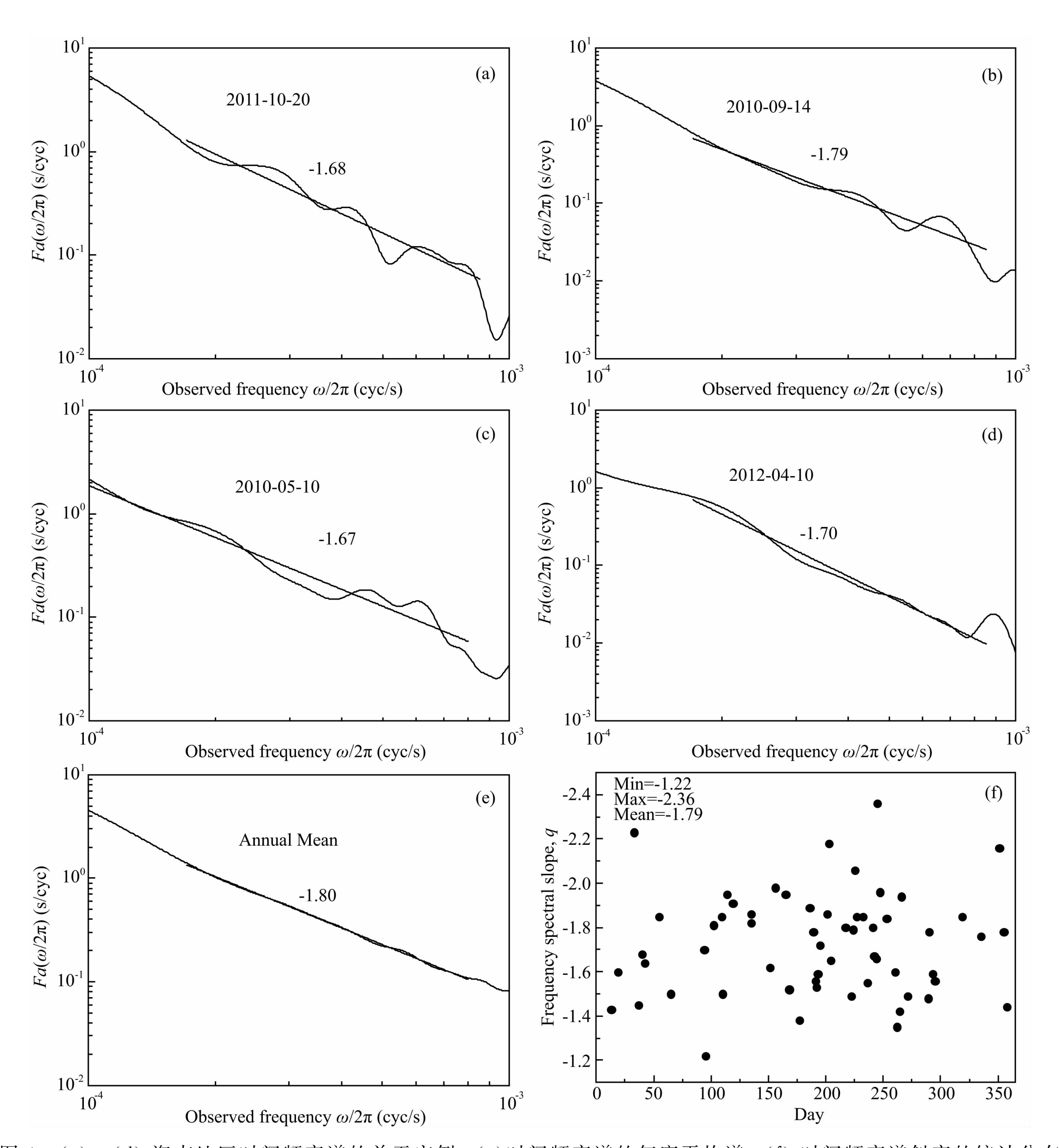


图4 (a)—(d)海南地区时间频率谱的单天实例;(e)时间频率谱的年度平均谱,(f)时间频率谱斜率的统计分布

Fig. 4 (a)—(d) Four examples of the temporal frequency power spectra of the atmospheric density perturbations associated with internal gravity waves at Hainan; (e) Annual mean of temporal frequency spectra and (f) the distribution of their spectrum slopes

我们认为海南地区的重力波活动情况也极有可能是来自于青藏高原的地形及对流作用.

其次,针对海南地区不同于中高纬度地区的冬季重力波频度及强度较弱的特点,我们认为,对于处于低纬度的海南地区,由于其海洋上存在频繁的强对流,往往会导致其成为该地区新的重力波波源. Wright 和 Gille 运用 High Resolultion Dynamics Limb Sounder(HIRDLS)研究中国南海上空重力波通量的季节特性时发现,在季风周期里,中国南海上空重力波通量的增量全球最小,他们把该区域重力波通量与季风变化的反季节性变化归因于这一区域里存在的由海上对流而产生的强烈而又频繁的台风因素(Wright and Gille, 2011). Alexander 等对中国南海上空重力波通量的观测研究给出了相似的结论,认为该区域是全球强烈上升气旋的重要形成地之一(Alexander et al., 2008). 所以海南激光雷达所观测到的常见重力波,除了可能主要来自青藏高原之外,还有一部分来自于中国南海. 同时, Wright 和 Gille(2011)的研究结论也表明中国南海地区冬季存在另外较强的重力波波源,导致这一地区的重力波动量通量最小,这一结论与我们的观测结论相吻合. 但根据海南岛的气候特征,每年的11月—

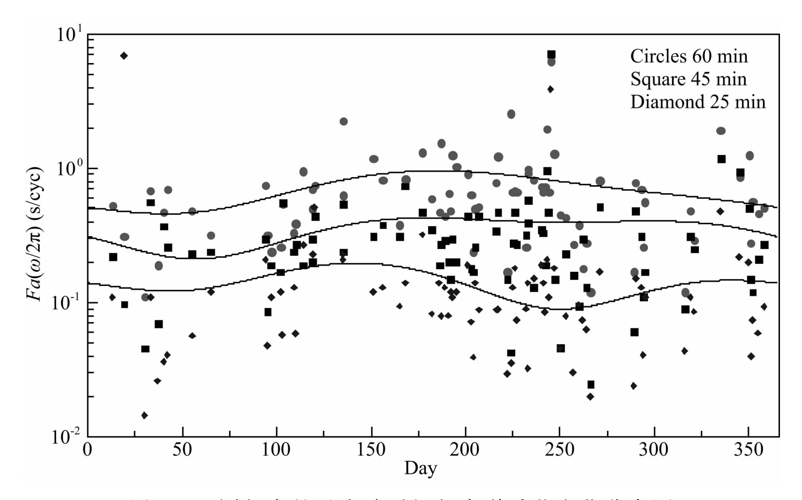


图 5　不同频率的重力波时间频率谱季节变化分布图

Fig. 5　Seasonal variations of temporal frequency spectral amplitudes

1 月属气象学意义上的旱季,根据气象记录很少有强对流的台风天气出现,因此,冬季海南地区的重力波波源除海面强对流因素以外应还有其他波源存在.

结合地形因素进行分析可知,海南岛地处我国南海地区,而这一地区受到西太平洋赤道潜流的影响,其洋流流向及温度会产生较大波动(Izumo, 2005),产生的平行剪切应力可在洋流环境下形成如 Bickley 喷流等现象,可能影响深层洋流的行为,导致该地域海面上的浮力频率发生变化,从而使该地区携带能量的重力波出现吸收及破碎过程. 而在这一过程中有可能同时发生波波相互作用而成为新的重力波波源(Smyth and Moum, 2002). 因此,冬季海南地区存在的其他波源极有可能是来自于西太平洋的赤道潜流所造成的.

基于以上分析,我们认为海南地区上空重力波活动季节性变化的主要原因可能是青藏高原的地形与南海地区的强对流因素与赤道潜流共同作用的结果. 在夏季的过程中,雷达观测的重力波扰动强度为全年最大,主要由青藏高原的地形因素和海上强对流共同作用,春秋两季的重力波可能受到来自青藏高原的地形及对流作用影响,其扰动规律与中纬度大陆地区相类似,为全年扰动最弱时期. 冬季由于我国南海地区受到赤道潜流的影响,以及部分热带强对流因素,导致其不同于我国绝大部分中纬度及中低纬度地区冬季重力波活动较弱的特性,其活动强度仍然较强,具有独特的季节分布特性. 另一方面,由于我们获得的重力波数据主要依靠激光雷达观测手段,由其自身特点所限制,所包含的信息并不全面,因此探索重力波季节性变化的根本原因需要更多的观测手段来配合进行,而这也有待于我们进一步地深入研究.

3　结论

利用激光雷达技术对海南地区上空钠层进行观测,积累连续 3 年的夜间观测数据对重力波活动规律进行研究. 根据重力波的线性理论,得到了海南地区上空的大气密度扰动、空间功率谱及时间频率谱. 通过选取波长为 8、4、2、1 km 的特定波长的重力波以及具有波动周期为 60、45、25 min 的特定频率的重力波活动辅助研究大气密度扰动的季节变化规律,得到了海南地区大气密度扰动具有夏季最大、春秋季扰动较小、冬季重力波活动仍然活跃的结论. 根据计算得出平均大气密度扰动的均方根值为 5.63%. 拟合得到重力波垂直功率谱 p 的变化范围为 −2.14 ～ −3.56,年平均值为 −2.93. 频率谱的谱斜率 q 的分布范围在 −1.22 和 −2.36 之间,平均值为 −1.80. 该结论表明海南地区重力波活动规律与扩散滤波理论相符. 经过对重力波波源情况以及海南地区特殊的地理环境进行分析,我们认为青藏高原的地形以及南海的热带强对流与赤道潜流因素是导致海南上空重力波活动季节性变化的可能原因.

致谢　本文得到了国家子午工程数据的大力支持,在此表示衷心的感谢.

References

Alexander M J, Gille J, Cavanaugh C, et al. 2008. Global estimates of gravity wave momentum flux from High Resolution Dynamics Limb Sounder observations. *J. Geophys. Res.*, 113: D15S18.

Beatty T J, Hostetler C A, Gardner C S. 1992. Lidar observations

of gravity waves and their spectra near the mesopause and stratopause at Arecibo. *J. Atoms. Sci.*, 49(6): 477-496.

Collins R L, Nomura A, Gardner C S. 1994. Gravity waves in the upper mesosphere over Antarctica: lidar observations at the South Pole and Syowa. *Geophys. Res. Lett.*, 99(D3): 5475-5485.

Dewan E M. 1994. The saturated-cascade model for atmospheric gravity wave spectra, and the wavelength-period (W-P) relations. *Geophys. Res. Lett.*, 21(9): 817-820.

Gardner C S, Voelz D G. 1987. Lidar studies of the nighttime sodium layer over Urbana, Illinois: 2. Gravity waves. *J. Geophys. Res.*, 92(A5): 4673-4694.

Gardner C S. 1994. Diffusive filtering theory of gravity wave spectra in the atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 99(D10): 20601-20622.

Gardner C S. 1996. Testing theories of atmospheric gravity wave saturation and dissipation. *J. Atoms. Terr. Phys.*, 58(14): 1575-1589.

Gong S H, Yang G T, Xu J Y, et al. 2013. Statistical characteristics of atmospheric gravity wave in the mesopause region observed with a sodium lidar at Beijing, China. *J. Atoms. Sol.-Terr. Phys.*, 97: 143-151.

Hines C O. 1991. The saturation of gravity waves in the middle atmosphere. Part II. Development of Doppler-spread theory. *J. Atmos. Sci.*, 48(11): 1361-1379.

Izumo T. 2005. The equatorial undercurrent, meridional overturning circulation, and their roles in mass and heat exchanges during El Niño events in the tropical Pacific ocean. *Ocean Dynamics*, 55(2): 110-123.

Senft D C, Gardner C S. 1991. Seasonal variability of gravity wave activity and spectra in the mesopause region at Urbana. *J. Geophys. Res.*, 96(D9): 17229-17264.

Senft D C, Hostetler C A, Gardner C S. 1993. Characteristics of gravity wave activity and spectra in the upper stratosphere and upper mesosphere at Arecibo during early April 1989. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 55(3): 425-439.

Smyth W D, Moum J N. 2002. Shear instability and gravity wave saturation in an asymmetrically stratified jet. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 35(3): 265-294

Tsuda T, Inoue T, Kato S, et al. 1989. MST radar observations of a saturated gravity wave spectrum. *J. Atmos. Sci.*, 46(15): 2440-2447.

Wan W X, Yuan H, Ning B Q, et al. 1998. Traveling ionospheric disturbances associated with the tropospheric vortexes around Qinghai-Tibet Plateau. *Geophys. Res. Lett.*, 25(20): 3775-3778.

Wright C J, Gille J C. 2011. HIRDLS observations of gravity wave momentum fluxes over the monsoon regions. *J. Geophys. Res.*, 116(D12): D12103, doi: 10.1029/2011JD015725.

Xu G R, Wan W X, She C L, et al. 2008. The relationship between ionospheric total electron content (TEC) over East Asia and the tropospheric circulation around the Qinghai-Tibet Plateau obtained with a partial correlation method. *Adv. Space. Res.*, 42(1): 219-223.

Yang G T, Clemesha B, Batista P, et al. 2006. Gravity wave parameters and their seasonal variations derived from Na lidar observations at 23°S. *J. Geophys. Res.*, 111: D21107.

Yang G T, Clemesha B, Batista P, et al. 2008a. Improvement in the technique to extract gravity wave parameters from lidar data. *J. Geophys. Res.*, 113: D19111.

Yang G T, Clemesha B, Batista P, et al. 2008b. Lidar study of the characteristics of gravity waves in the mesopause region at a southern low-latitude location. *J. Atoms. Sol.-Terr. Phys.*, 70(7): 991-1011.

Zhang T M, Wang J H, Fu J, et al. 2013. Study of sodium layer density over Haikou by lidar during the night of 4 May 2010. *Chin. J. Space Sci.* (in Chinese), 33(1): 48-52.

附中文参考文献

张铁民，王继红，傅军等. 2013. 2010 年 5 月 4 日夜间海口上空钠层密度的激光雷达观测研究. 空间科学学报，33(1): 48-52.

(本文编辑 胡素芳)